

基于自主飞行的小型无人机动力自适应模糊控制

席庆彪¹, 袁冬莉², 张洪才²

(1. 西北工业大学 无人机研究与发展中心, 陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 自动控制系, 陕西 西安 710072)

摘要:针对传统无人机动力系统控制的局限性,提出小型无人机动力自适应模糊控制策略。在飞行控制计算机内建立发动机工作点的自适应模糊控制器,同时控制发动机油门和风门,并将其融进二维查询表中,利用传感器获取当前的发动机工作状态信息,通过软件方法进行查表,经简单的因子换算即可获取精确的输出控制量,实现对发动机的闭环监控。

关键词:无人机;发动机;模糊控制

中图分类号:V292 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)04-12-15

自主飞行是衡量无人机系统性能的一个重要战术指标,而稳定适量的飞行动力是保证飞行安全的必要前提。从飞行剖面^[1]来看飞行过程基本由爬升、定高巡航及待机、返航俯冲等阶段所构成,显然不同的飞行姿态、高度以及速度需用不同的发动机推力;同时由于飞行过程中随机扰动的存在,因此需实时调整发动机有关控制量,保证飞行动力需要。显然发动机控制过程呈极强的时变及非线性特征。对于小型无人机 RPV (Remote Piloted Vehicle) 而言,发动机均需要经过无线电信道由地面控制站 GCS (Ground Control Station) 操纵人员进行监控,此时若进行自主飞行,即造成事实上的动力控制系统开环,而系统扰动却可能使发动机工作点振荡甚至发散,从而导致空中停车飞行事故,可见传统意义上的动力控制将无法适应自主飞行的需求。因此希望建立这样一种动力控制系统,由无人机飞行控制计算机自主执行对发动机工作状态的监控,适应飞行状态的变化,满足无人机自主飞行所需的动力供给。然而由于目前缺乏精准的被控对象——发动机数学模型,若采用传统的设计方法将很难建立简单可靠的控制系统;同时由于小型无人机重量轻、体积小以及系统配置简单等特点的约束,也不可能建立太过复杂的控制系统。而模糊控制则不需精确的数学模型且系统实现简单,不失为解决此类不确定性系统控制的一种有效途径,针对无人机飞行环境以及其发动机特点,本文提出基于自主飞行的小型无人机动力自适应模糊控制策略。传统上对小型无人机动力系统来说,我们只对发动机风门进行控制,但对于一些特殊飞行,如长航时飞行,若不控制发动机油门,有可能造成燃料浪费或未完成燃料已耗尽的情况。因此采用同时控制发动机风门和油门的策略,以保证飞行任务的顺利完成。

1 动力自适应模糊控制系统设计

无人机机载飞行控制计算机通过传感器采集有关发动机信息,经模糊控制器解算,输出确定的控制量驱动发动机风门以及油门舵机,使转速自适应飞行状态的变化并且能够稳定在需要范围内。显然对于不具备经典数学表述的被控过程——发动机转速而言,可采用特征规则代替传递函数来加以描述^[2]。

$$\begin{aligned}\delta_{\omega_1} &= f_1(R, dR) \\ \delta_{\omega_2} &= f_2(R, dR)\end{aligned}\quad (1)$$

式中, R, dR 及分别为发动机转速以及转速变化率,而 δ_{ω_1} 和 δ_{ω_2} 为发动机风门以及油门舵机偏转量。对发动机转速控制回路而言,若定义:

收稿日期:2001-02-12

基金项目:海军科研项目资助(H/KJC6B)

作者简介:席庆彪(1964-),男,安徽合肥人,高级工程师,主要从事飞行控制、无人机定位导航、计算机控制等研究。

$$\begin{aligned} \mu_R &\stackrel{\Delta}{=} R(r/m) \\ \mu_{dR} &\stackrel{\Delta}{=} dR(r/m^2) \\ \mu_{\delta_{T1}} &\stackrel{\Delta}{=} \delta_{i1}(d) \\ \mu_{\delta_{T2}} &\stackrel{\Delta}{=} \delta_{i2}(d) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mu_R, \mu_{dR}, \mu_{\delta_{T1}}$ 及 $\mu_{\delta_{T2}}$ 分别是 R, dR, δ_{i1} 和 δ_{i2} 的模糊变量。则对于当前的输入输出 $(R, dR, \delta_{i1}, \delta_{i2})$ 而言, 其模糊集分别有^[3-4]

$$\begin{aligned} R &\in \{NB, NS, ZR, PS, PB\} \\ dR &\in \{NB, NS, ZR, PS, PB\} \\ \delta_{i1} &\in \{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\} \\ \delta_{i2} &\in \{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\} \end{aligned} \quad (3)$$

显然, 系统的控制规则、量化因子以及隶属函数等均能自适应系统飞行状态的变化(如爬升、巡航、待机和俯冲等)。不失一般性, 某型无人机待机作业飞行阶段发动机模型定义有^[2]

$$\begin{aligned} R: [4\ 300, 4\ 500] \quad \mu_R &\in \{-5\ -4\ -3\ -2\ -1\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\}, \text{量化因子 } K_1 = 20。 \\ dR: [-150, 150] \quad \mu_{dR} &\in \{-5\ -4\ -3\ -2\ -1\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\}, \text{量化因子 } K_2 = 30。 \\ \delta_{i1}: [70, 90] \quad \mu_{\delta_{i1}} &\in \{-7\ -6\ -5\ -4\ -3\ -2\ -1\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\}, \text{量化系数 } K_3 = 1.43。 \\ \delta_{i2}: [80, 90] \quad \mu_{\delta_{i2}} &\in \{-7\ -6\ -5\ -4\ -3\ -2\ -1\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\}, \text{量化系数 } K_3 = 1.07。 \end{aligned}$$

则系统对应的隶属函数如图 1、图 2 所示。

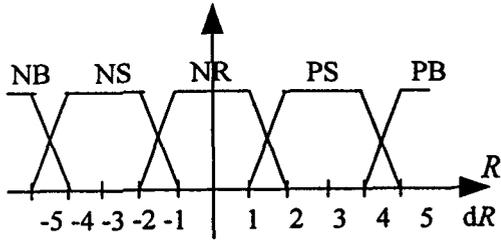


图 1 输入量隶属函数

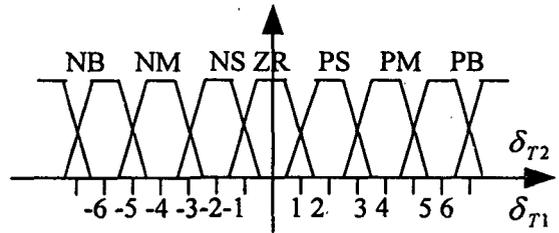


图 2 输出调节量隶属函数

发动机转速模糊控制律有:

$$\begin{aligned} R_1: &\text{if } R = NB \text{ and } dR = NS \text{ then } \delta_{i1} = PB \text{ and } \delta_{i2} = PM \\ \text{or } R_2: &\text{if } R = PB \text{ and } dR = PS \text{ then } \delta_{i1} = NB \text{ and } \delta_{i2} = NM \end{aligned} \quad (4)$$

任意模糊规则 R_i , 由最小算子算法^[3-5] 不难得该条件的满足度为

$$\mu_{R_i \cap dR_i} = \min \{ \mu_{R_i}(R), \mu_{dR_i}(dR) \} \quad (5)$$

总的模糊关系满足

$$\begin{cases} R = \bigcup_{i=1}^n R_i \\ \mu_R(R, dR, \delta_{i1}, \delta_{i2}) = \max \{ \min \{ \min \{ \mu_{R_i}(R); \mu_{dR_i}(dR) \}; \mu_{\delta_{T1}}(\delta_{i1}); \mu_{\delta_{T2}}(\delta_{i2}) \} \} \end{cases} \quad (6)$$

不失一般性, 则对任意离散输入 (R^*, dR^*) , 其风门模糊输出有

$$\begin{cases} \delta_{T1} = (R^* \cdot dR^*) \cdot R \\ \mu_{\delta_{T1}}(\delta_{i1}) = \max_{r, dr} \min \{ \mu_{R_i}(R^*); \mu_{dR_i}(dR^*); \mu_{\delta_{T1}}(\delta_{i1}) \} \end{cases} \quad (7)$$

显然, 模糊输出 δ_{i1} 为一多边形面积, 采用 COG (Center of Gravity) 方法^[5] 实现去模糊化, 可获得对于输入 (R^*, dR^*) 的非模糊输出值。

$$\delta_{i1}^* = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{T1i} \mu_{\delta_{T1}}(\delta_{i1i})}{\sum_{i=1}^n \mu_{\delta_{T1}}(\delta_{i1i})} \quad (8)$$

对所有可能输入状态的非模糊输出进行计算, 即可获取模糊控制 δ_{T1} 查询表, 如表 1 所示。

表1 模糊控制查询表

δ_n	dR										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	x	7	7	6	5	4	3	2	1	0	0
-4	7	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0
-3	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	-1
-2	6	5	4	3	2	1	0	0	0	-1	-2
-1	5	4	3	2	1	0	0	0	-1	-2	-3
R	0	4	3	2	1	0	0	0	-1	-2	-3
	1	3	2	1	0	0	-1	-2	-3	-4	-5
	2	2	1	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
	3	1	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
	4	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	7
	5	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	x

在工程实现过程中可将该查询表直接存入飞行控制计算机可编程存储器如 EPROM 内或电子盘内。在实际操作过程中,可根据量化后的输入,表即可得出控制量的非模糊值,在乘以量化系数 K_3 即为控制精确的输出量。同理可以获得油门以及气道输出控制的精确量。

2 仿真实例

某小型无人机在作业高度低速待机飞行,其发动机失稳转速为 4 410 r/min。对系统而言,考虑到系统 5% 的安全余量,则飞行理想给定转速为 4 200 r/min;对于具有典型长周期运动模态特征的飞行而言,其速度变化可导致发动机的转速变化,不妨取系统长周期运动所造成的系统扰动允许误差为 ± 30 (r/min)。在随机风场扰动下,对传统控制模式下的系统以及引入自适应模糊控制的系统分别进行仿真,系统仿真见图 3、图 4 所示。

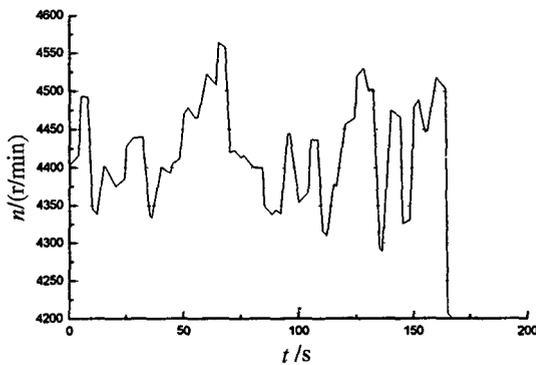


图3 未引入模糊控制的系统仿真

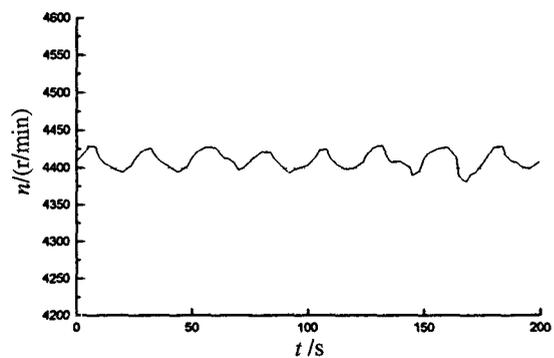


图4 引入模糊控制的系统仿真

仿真表明:干扰条件下的发动机工作点变化较大($4\ 198 \leq (r/min) \leq 4\ 563$),甚至造成空中停车的飞行事故,显然原始系统无法保证发动机低转速稳定工作。而采用模糊控制对发动机进行闭环控制,则可以有效地抑制干扰对系统造成的品质恶化,保证发动机低速工作的稳定性($4\ 381 \leq (r/min) \leq 4\ 430$),显然自适应模糊系统具有良好的快速性和鲁棒性。

3 结束语

离散式自适应模糊控制器将复杂的模糊计算融进查询表中,不仅可以节省计算机存储空间,而且可以提高计算速度,具有很强的实用性。显然对于小型无人机动力控制系统而言,采用自适应模糊控制思想,可以有效地解决缺乏对象数学模型以及存在系统设置约束的发动机闭环控制问题,有效地保证小型无人机自主飞行,提高系统的可靠性以及自适应性。

参考文献:

- [1] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京:航空工业出版社,1994.
- [2] Lee C C. Fuzzy logic in control system;fuzzy logic controller[J]. Part 1IEEE trans. on System Man And Cybernetics, 1990,20(2):404-418.
- [3] Zadeh L A. Fuzzy set[J]. Information and Control, 1965, 8(3):338-354.
- [4] Zimmermann H J. Fuzzy Sets Theory and Its Applications [M]. 2nded. Hingham:Springer-Verlag,1992.
- [5] 王磊,王伟民. 模糊控制理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1997.

An Motive Adaptive Fuzzy Control for an Engine of the RPV Based on Independent Flight

XI Qing-biao¹, YUAN Dong-li², ZHANG Hong-cai²

- (1. The Institute for Drone, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
- 2. Dept. of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the limitation of the traditional RPV dynamic control system, an adaptive fuzzy control strategy of the RPV engine is put forward. We produce an adaptive fuzzy controller which can control wind-gate and oil-gate for the working points of the RPV engine in the flight control computer and put it into a two dimension inquired table. After getting present information on the state of the engine by a sensor, we inquire the table by software, at the same time we can get the accurate out-put controlled variable simply by transiting factors. In this way we can achieve the closed-loop control of the engine.

Key words: remote piloted vehicle(RPV); engine; fuzzy control